



Исследование параметров гидротранспортирования хвостов обогащения медно-порфировых руд

С.Ю. Авксентьев, В.И. Белоусов ✉

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ s245065@stud.spmi.ru

Резюме: В статье представлены результаты лабораторного исследования параметров гидротранспортирования хвостов обогащения медно-порфировой руды. Рассмотрено влияние массовой концентрации твердой фазы и внутреннего диаметра трубопровода на величину потерь напора при движении гидросмеси. Эксперименты проводились на лабораторной гидротранспортной установке с использованием трубопроводов диаметром 50, 40 и 25 мм. Исследования выполнялись для гидросмесей с массовой концентрацией твердой фазы 15, 25, 40, 50 и 60%, а также для воды без добавления твердого материала. В результате проведенных лабораторных исследований установлено, что потери напора при гидротранспортировании хвостов обогащения медно-порфировой руды существенно зависят от массовой концентрации твердой фазы и внутреннего диаметра трубопровода. Увеличение концентрации гидросмеси приводит к росту гидравлических сопротивлений, что особенно заметно при транспортировании смесей с содержанием твердой фазы 40–60%. Гранулометрический анализ показал, что исследуемые хвосты характеризуются высокой долей тонкодисперсных частиц. Преобладание фракции менее 45 мкм способствует формированию внутренней структуры гидросмеси и проявлению неньютоновских свойств. Полученные экспериментальные зависимости позволяют уточнить расчет потерь напора при гидротранспортировании хвостовых гидросмесей, оценить влияние диаметра трубопровода на энергетические характеристики процесса и обосновать выбор рациональных параметров трубопроводной системы. Результаты исследования позволяют повысить надежность при проектировании и снизить энергозатраты эксплуатации гидротранспортных систем горно-обогаительных предприятий. Полученные результаты позволят повысить устойчивость электротехнической системы угольной шахты.

Ключевые слова: гидротранспорт, сгущенные гидросмеси, хвосты обогащения, медно-порфировые руды, тонкодисперсные частицы, потери напора, массовая концентрация

Для цитирования: Авксентьев С.Ю., Белоусов В.И. Исследование параметров гидротранспортирования хвостов обогащения медно-порфировых руд. *Горная промышленность*. 2026;(4S):04–11. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-04-11>

A study of hydraulic transport parameters for copper–porphyry refuse ores

S.Yu. Avksentyev, V.I. Belousov ✉

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation
✉ s245065@stud.spmi.ru

Abstract: The paper presents the results of a laboratory study of the hydraulic transport parameters for copper–porphyry refuse ores. The effects of the solids mass concentration and the pipeline internal diameter on head losses during the slurry flow were analyzed. The tests were performed using a laboratory test bench for hydraulic transportation with 50, 40, and 25 mm pipelines. The study considered slurries with the solids mass concentrations of 15, 25, 40, 50, and 60%, as well as water without added solids. Laboratory tests have shown that the head losses during hydraulic transportation of copper–porphyry refuse ore significantly depend on the mass concentration of the solid phase and the internal diameter of the pipeline. An increase in the slurry concentration results in higher hydraulic resistance, which is particularly apparent when transporting mixtures with the solids content of 40–60%. Particle size analysis showed that the investigated tailings are characterized by a high share of fine dispersed particles. Prevalence of the fraction below 45 μm contributes to formation of the internal structure of the slurry and manifestation of non-Newtonian properties. The obtained experimental relationships refine head loss calculations for the refuse ore slurries, allow assessing the impact of the pipeline diameter on the energy characteristics of the process, and justify the selection of rational pipeline system parameters. The results of this study make it possible to improve design reliability and reduce the energy consumption associated with operation of hydraulic transport systems at mining and processing plants.

Keywords: hydraulic transport, thickened slurries, refuse ores, copper–porphyry ores, fine dispersed particles, head loss, solids mass concentration

For citation: Avksentyev S.Yu., Belousov V.I. A study of hydraulic transport parameters for copper–porphyry refuse ores. *Russian Mining Industry*. 2026;(4S):04–11. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-04-11>

Введение

Одним из приоритетных направлений повышения эффективности горнорудного производства является совершенствование транспортных систем, обеспечивающих перемещение минерального сырья и продуктов его переработки с минимальными энергетическими и эксплуатационными затратами [1–3]. В условиях роста производительности горно-обогатительных предприятий особое значение приобретают непрерывные виды транспорта, среди которых широкое применение получил гидравлический трубопроводный транспорт [4; 5].

Гидротранспортные системы используются для перемещения хвостов обогащения, концентратов и других дисперсных минеральных материалов [6; 7]. Эксплуатация таких систем сопровождается рядом технических проблем, включая значительные удельные потери напора, интенсивный гидроабразивный износ трубопроводов, высокую металлоемкость оборудования и существенные энергозатраты на перекачивание гидросмесей [8; 9].

Энергетическая эффективность гидравлического транспорта определяется совокупным влиянием гидравлических сопротивлений, плотности транспортируемой среды и концентрации твердой фазы [10; 11]. При этом ключевыми параметрами, влияющими на удельную энергоемкость процесса, являются удельные потери напора при движении гидросмеси по трубопроводу и объемная концентрация твердых частиц [12; 13]. Снижение гидравлических потерь при одновременном увеличении концентрации твердой фазы позволяет уменьшить затраты энергии на транспортирование единицы массы хвостов обогащения [14].

Анализ работы гидротранспортных систем на горных предприятиях показывает, что эффективность использования этого вида транспорта не соответствует его техническим возможностям, высока трудоемкость работ при эксплуатации оборудования, высок гидроабразивный износ трубопроводов, высока металлоемкость и энергоемкость гидротранспортных систем [15].

Из предыдущих работ следует, что снижение удельных потерь напора при одновременном увеличении концентрации твердой фазы является одним из основных условий повышения энергетической эффективности гидротранспортирования [16]. Вместе с тем чрезмерное увеличение концентрации может приводить к росту вязкости, формированию внутренней структуры гидросмеси и увеличению сопротивлений движению. Следовательно, определение рациональных параметров транспортирования требует экспериментального исследования связи между концентрацией твердой фазы, диаметром трубопровода и величиной гидравлических потерь [17].

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью уточнения закономерностей изменения потерь напора при транспортировании хвостов обогащения медно-порфировых руд, характеризующихся высокой долей тонкодисперсных частиц [18; 19]. Получение экспериментальных зависимостей для гидросмесей различной концентрации позволяет более обоснованно выбирать параметры трубопроводных систем, оценивать режимы течения и снижать энергозатраты при эксплуатации гидротранспортного оборудования [20; 21].

Целью работы является исследование влияния массовой концентрации твердой фазы и внутреннего диаметра трубопровода на потери напора при гидротранспортировании хвостов обогащения медно-порфировой руды.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: определение гранулометрического состава твердой фазы, проведение лабораторных исследований движения гидросмесей различной концентрации по трубопроводам разных диаметров, расчет потерь напора и коэффициентов гидравлического сопротивления, анализ изменения начального гидравлического уклона и оценка характера течения гидросмеси.

Материалы и методы

Лабораторные исследования параметров гидротранспортирования хвостовой пульпы медно-порфировой руды проводились на экспериментальной установке кафедры горных транспортных машин Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II. Схема и общий вид лабораторной установки представлены на рис. 1.

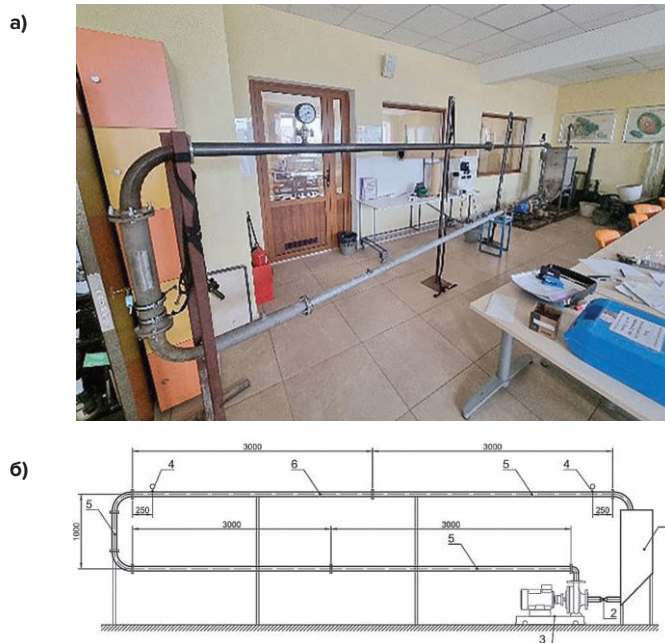


Рис. 1
Общий вид (а) и схема (б) лабораторной гидротранспортной установки:
1 – расходный бак $V = 100$ л;
2 – кран шаровый;
3 – центробежный насос;
4 – образцовый манометр с разделителем сред;
5 – трубопровод стальной различных диаметров;
6 – ультразвуковой расходомер

Fig. 1
A general view (a) and a schematic diagram (b) of the laboratory test bench for hydraulic transportation:
1 – supply tank, $V = 100$ L;
2 – ball valve;
3 – centrifugal pump;
4 – reference pressure gauge with a diaphragm (media) separator;
5 – steel pipeline sections of various diameters;
6 – ultrasonic flow meter

В ходе экспериментов жидкая среда – вода либо подготовленная гидросмесь – подавалась из расходного бака объемом 100 л в трубопроводную систему с использованием центробежного насоса П12.5/12.5СП производительностью 12,5 м³/ч. В качестве твердой фазы применялись хвосты обогащения медно-порфировой руды. Измерение параметров течения осуществлялось на трубопроводах различного внутреннего диаметра, что позволило оценить влияние геометрических характеристик трубопровода на величину гидравлических потерь.

Гранулометрический состав твердой фазы был определен по классам крупности. Полученные данные приведе-



ны в табл. 1. Анализ распределения частиц показал, что исследуемый материал характеризуется преобладанием тонкодисперсной фракции. Наибольшая доля приходится на класс крупности менее 45 мкм, содержание которого составляет 59,2%. Доля частиц крупностью 71 мкм составляет 23,1%, а фракции –71+45 мкм – 17,7%. Средневзвешенный диаметр частиц, рассчитанный по формуле (1), составил 0,04 мм.

Таблица 1
Гранулометрический состав
хвостов обогащения медно-
порфировой руды

Класс крупности, мкм	Выход, %
71	23,1
–71+45	17,7
–45+0	59,2

Table 1
Particle size distribution
of the copper-porphyry refuse
ores

$$d_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{n=5} P_i \cdot d_i}{100} = 0,04 \text{ мм.} \quad (1)$$

Распределение твердой фазы по классам крупности представлено в виде гистограммы на рис. 2. Полученные данные свидетельствуют о высокой дисперсности материала, что является важным фактором при анализе реологических свойств гидросмеси и формировании сопротивлений при ее движении в трубопроводе [22; 23].

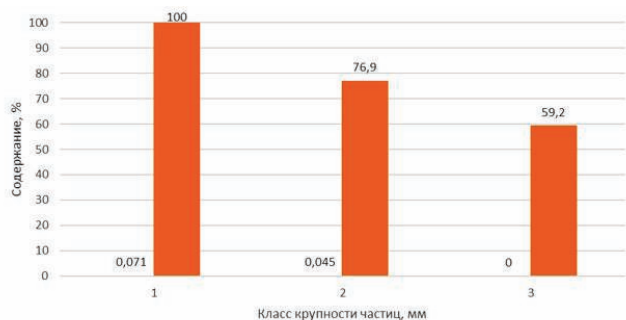


Рис. 2
Гистограмма распределения
твердых частиц хвостов

Fig. 2
A bar chart of the particle size
distribution of solids in the
refuse ores slurries

Массовая концентрация гидросмеси определялась как отношение массы загружаемой твердой фазы к общей массе гидросмеси. Расчет выполнялся по формуле (2). Для проведения экспериментов были подготовлены ги-

Таблица 2
Экспериментальные данные течения гидросмесей хвостов
обогащения медно-порфировой руды

Диаметр трубы, мм	Потери напора (м) / Re при массовой концентрации %					
	15	25	40	50	60	Вода
50	0,26 / 95200	0,572 / 4064	0,723 / 1278	0,919 / 1005	1,263 / 732	0,260 / 87533
40	0,827 / 53910	1,565 / 9848	1,648 / 3419	1,901 / 1340	1,949 / 1308	0,704 / 104040
25	3,827 / 96017	7,242 / 17539	7,626 / 6089	8,797 / 3440	9,585 / 2440	3,412 / 1688092

дросмеси с различной массовой концентрацией твердого материала. Измерения выполнялись при концентрациях 15, 25, 40, 50 и 60%, а также при транспортировании воды без добавления твердой фазы для проверки лабораторной установки на соответствие режимов работы:

$$c_p = \frac{M_{TB}}{M_{CM}} = \frac{M_{TB}}{M_B + M_{TB}}, \quad (2)$$

где c_p – массовая концентрация гидросмеси, доли ед.; M_{TB} – масса загружаемых в расходный бак твердых хвостов, кг; M_B – масса воды, численно равная объему воды, кг.

Замеренные средние значения потерь напора, полученные при экспериментальных исследованиях течения по трубопроводу гидросмесей хвостов обогащения медно-порфировой руды пяти концентраций при трех различных внутренних диаметрах трубопровода, приведены в табл. 2.

Средние значения потерь напора, полученные при исследовании движения гидросмесей хвостов обогащения медно-порфировой руды по трубопроводам различных внутренних диаметров, приведены в табл. 2. Эксперименты выполнялись для труб диаметром 50, 40 и 25 мм. Для каждого диаметра фиксировались значения потерь напора при различных концентрациях твердой фазы, а также параметры течения воды, использованные для сравнительной оценки.

Графические зависимости потерь напора от концентрации гидросмеси и внутреннего диаметра трубопровода представлены на рис. 3. Анализ полученных зависимостей

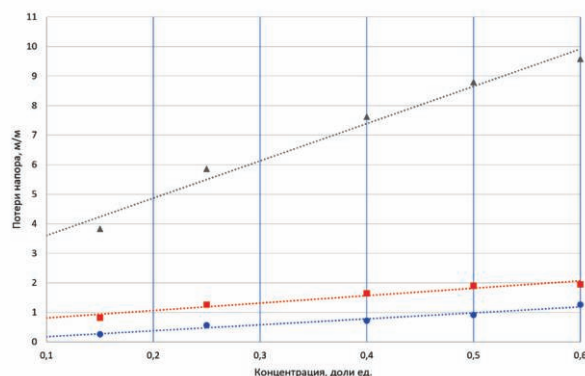


Рис. 3
График зависимости потерь
напора от концентрации
гидросмеси и внутреннего
диаметра трубопровода

Fig. 3
Head loss as a function
of the slurry concentration
and pipeline internal diameter

показывает, что увеличение массовой концентрации твердой фазы сопровождается ростом потерь напора.

Данная закономерность наиболее выражена при уменьшении внутреннего диаметра трубопровода, что связано

Table 2
Experimental data on the flow of copper-porphyry refuse
ore slurries

с увеличением удельного влияния пристенного трения и ростом сопротивлений движению потока.

На графиках видно, что при повышении концентрации гидросмеси наклон линейных участков зависимостей возрастает. Это указывает на усиление структурного взаимодействия между частицами твердой фазы и увеличение сопротивления движению смеси. Продолжение линейных участков кривых позволяет определить начальный гидравлический уклон i_0 , характеризующий сопротивление, которое необходимо преодолеть для начала движения структурированной гидросмеси.

Результаты

Начальный гидравлический уклон является одним из признаков проявления неньютоновских свойств гидросмеси. Для концентрированных суспензий, содержащих значительное количество тонкодисперсных частиц, характерно образование внутренней структуры, обусловленной силами сцепления, коагуляционными взаимодействиями и контактным трением между частицами [24; 25].

В рассматриваемом случае твердая фаза хвостов обогащения представлена преимущественно мелкими классами крупности, при этом содержание частиц размером менее 45 мкм достигает почти 60%. Такая дисперсность способствует формированию пространственной структуры в жидкой среде и определяет наличие начального сопротивления сдвигу [26; 27].

Начальные потери напора можно рассматривать как результат суммарного действия сопротивлений, обусловленных силами сцепления между частицами и силами трения при их взаимном перемещении [9; 10]. Данное соотношение представлено формулой:

$$i_0 = i_p + i_f, \quad (3)$$

где i_0 – начальный уклон; i_p – часть начального уклона, обусловленная силами сцепления между частицами; i_f – часть начального уклона, зависящая от сил трения между частицами.

На основании экспериментальных данных получена зависимость начального уклона от массовой концентрации твердой фазы и диаметра трубопровода (рис. 4), представленная формулой:

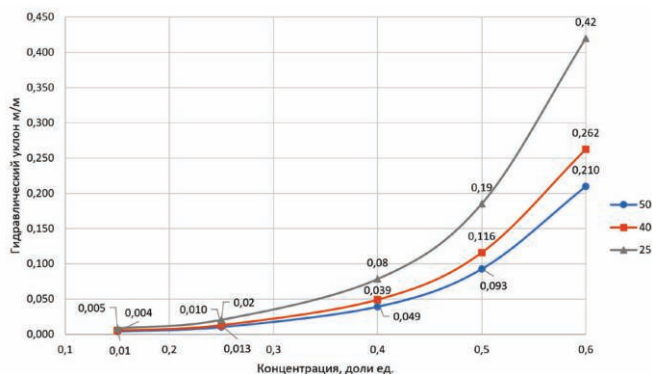


Рис. 4
Изменение начального уклона от концентрации твердой фазы гидросмеси

Fig. 4
Changes of the initial slope depending on the solids concentration in the slurry

$$i_0 = \frac{0,496 \cdot 10^{4,525 \cdot C_p}}{\rho_{cm} \cdot g \cdot D}. \quad (4)$$

Анализ экспериментальных зависимостей показывает, что при массовой концентрации твердой фазы 40–60% исследуемые гидросмеси проявляют свойства неньютоновских жидкостей. Их течение может быть описано с использованием модели Бингама–Шведова, учитывающей наличие предельного напряжения сдвига и пластической вязкости [28].

Для трубопроводов диаметром 50 и 40 мм при большинстве исследованных концентраций наблюдается ламинарный либо переходный режим течения. Для трубопровода диаметром 25 мм аналогичный характер течения проявляется преимущественно при концентрациях, близких к 50% и выше. Это связано с изменением гидравлических условий движения потока при уменьшении диаметра трубопровода и увеличении концентрации твердой фазы [14].

На основании экспериментальных данных были рассчитаны потери напора и коэффициенты гидравлического сопротивления для трубопроводов различного диаметра. Значения приведены в табл. 3. Расчет выполнялся по фор-

Таблица 3
Значения потерь напора по экспериментальным данным

Table 3
Head loss values based on the experimental data

Диаметр трубопровода, мм	Концентрация, доли ед.	Плотность, кг/м ³	Потери напора в трубопроводах, м вод.ст/м	Коэффициент сопротивления λ
50	0,15	1176	0,061	0,018
	0,25	1333	0,153	0,04
	0,4	1666	0,241	0,05
	0,5	1999	0,368	0,064
	0,6	2499	0,632	0,087
40	0,15	1176	0,195	0,021
	0,25	1333	0,338	0,032
	0,4	1666	0,55	0,041
	0,5	1999	0,762	0,048
	0,6	2499	0,781	0,049
25	0,15	1176	1,804	0,018
	0,25	1333	3,128	0,027
	0,4	1666	5,093	0,036
	0,5	1999	7,049	0,041
	0,6	2499	4,8	0,045

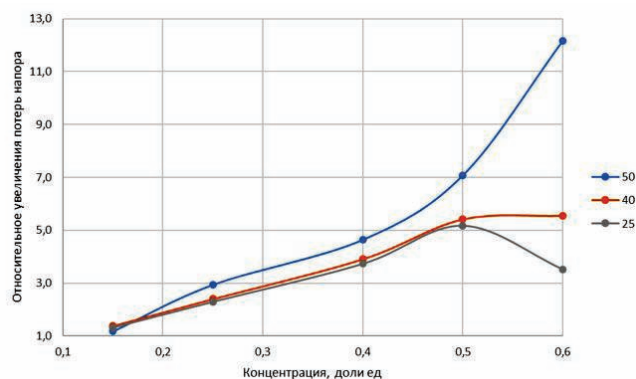


Рис. 5
Коэффициент относительного увеличения потерь напора в зависимости от концентрации гидросмеси и применяемого диаметра трубопровода

Fig. 5
Relative head loss increase coefficient as a function of the slurry concentration and pipeline diameter

муле (5), учитывающей скорость движения потока, диаметр трубопровода, плотность гидросмеси и плотность жидкости [29]:

$$i = \lambda \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g \cdot D} \cdot \frac{\rho_c}{\rho_0} \quad (5)$$

Полученные результаты показывают, что при увеличении концентрации гидросмеси возрастает как величина потерь напора, так и коэффициент сопротивления. Наиболее интенсивный рост потерь наблюдается в трубопроводе меньшего диаметра, что подтверждает существенное влияние геометрического фактора на энергетические характеристики гидротранспортирования [30].

Для сравнительной оценки влияния концентрации гидросмеси на гидравлические потери был выполнен расчет коэффициента относительного увеличения потерь напора. Подобный подход позволяет оценить изменение энергетических характеристик потока при переходе от транспортирования воды к транспортированию гидросмеси различной концентрации [31]. Результаты представлены на рис. 5.

Анализ данных показывает, что при увеличении массовой концентрации твердой фазы потери напора возрастают по сравнению с режимом транспортирования воды. Для трубопровода диаметром 50 мм увеличение потерь при концентрации 60% достигает 12,2 раза. Для трубопроводов диаметром 40 и 25 мм соответствующие значения составляют 5,6 и 3,5 раза.

Для дополнительной характеристики движения гидросмеси в трубопроводах различного диаметра использовалось число Фруда. Данный критерий применяется для оценки соотношения инерционных и гравитационных факторов, влияющих на характер движения потока в трубопроводе [32; 33]. Расчет выполнялся по формуле (6). Значения числа Фруда для различных концентраций и диаметров трубопровода приведены в табл. 4.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot D \cdot \rho_c}} \quad (6)$$

Полученные данные показывают, что с увеличением концентрации гидросмеси значения числа Фруда снижаются.

Таблица 4
Число Фруда для различных диаметров трубопроводов и концентраций гидросмеси

Table 4
The Froude number for various pipeline diameters and slurry concentrations

Диаметр трубопровода, мм	Число Fr в зависимости от концентрации				
	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
50	5,6	4,14	2,93	2,4	1,96
40	9,4	6,87	4,87	3,98	3,25
25	30,75	22,46	15,92	13,01	10,63

Это связано с увеличением плотности транспортируемой среды и изменением динамических характеристик потока. Одновременно уменьшение диаметра трубопровода приводит к росту числа Фруда, что указывает на усиление влияния инерционных факторов в потоке [34; 35].

При переходе от трубопровода диаметром 50 мм к диаметру 40 мм значения числа Фруда увеличиваются примерно на 40%. При уменьшении диаметра с 40 до 25 мм рост составляет около 70%. Наиболее выраженное увеличение наблюдается при сравнении трубопроводов диаметром 50 и 25 мм, где значения числа Фруда возрастают примерно на 82%.

Заключение

В результате проведенных лабораторных исследований установлено, что потери напора при гидротранспортировании хвостов обогащения медно-порфировой руды существенно зависят от массовой концентрации твердой фазы и внутреннего диаметра трубопровода. Увеличение концентрации гидросмеси приводит к росту гидравлических сопротивлений, что особенно заметно при транспортировании смесей с содержанием твердой фазы 40–60%.

Гранулометрический анализ показал, что исследуемые хвосты характеризуются высокой долей тонкодисперсных частиц. Преобладание фракции менее 45 мкм способствует формированию внутренней структуры гидросмеси и проявлению неньютоновских свойств. Для таких систем характерно наличие начального гидравлического уклона, величина которого возрастает при увеличении концентрации твердой фазы и уменьшается при увеличении диаметра трубопровода.

Экспериментальные зависимости подтверждают, что концентрированные гидросмеси хвостов обогащения в исследованном диапазоне концентраций могут рассматриваться как вязкопластичные среды, течение которых описывается моделью Бингама–Шведова. Полученные значения потерь напора, коэффициентов сопротивления и числа Фруда могут быть использованы при выборе рациональных параметров гидротранспортирования, расчете насосного оборудования и оценке энергетической эффективности трубопроводных систем.

Практическая значимость результатов заключается в возможности уточнения расчетов гидравлических потерь при транспортировании высококонцентрированных хвостовых гидросмесей. Это позволяет повысить надежность проектирования гидротранспортных систем и снизить энергозатраты при эксплуатации трубопроводов горно-обогатительных предприятий.



Список литературы / References

1. Волгина Л.В., Сергеев С.А., Романова А.А. Особенности проектирования систем гидротранспорта горнообогатительных фабрик. *Вестник МГСУ*. 2024;19(12):1951–1962. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2024.12.1951-1962>
Volgina L.V., Sergeev S.A., Romanova A.A. Design of hydraulic transport systems for mining and processing plants. *Vestnik MGSU*. 2024;19(12):1951–1962. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2024.12.1951-1962>
2. Васильева М.А., Голик В.И., Зеленцова А.А. Методы интенсификации трубопроводного транспортирования гидросмесей при закладке выработанного пространства. *Записки Горного института*. 2024:1–13. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16502> (дата обращения: 08.03.2026).
Vasilyeva M.A., Golik V.I., Zelentsova A.A. Methods of intensification of pipeline transportation of hydraulic mixtures when backfilling mined-out spaces. *Journal of Mining Institute*. 2024:1–13. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16502> (accessed: 08.03.2026).
3. Куликова А.А., Ковалева А.М. Применение хвостов обогащения в качестве закладки выработанного пространства рудников. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(2-1):144–154. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-144-154>
Kulikova A.A., Kovaleva A.M. Use of tailings of enrichment for laying of the developed space of mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(2-1):144–154. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-144-154>
4. Babyr N.V., Kuziev D.A., Sazankova E.S., Dobler M.O. Influence of cyclic impacts of powered roof support on weakening of immediate roof rocks. *Eurasian Mining*. 2026;(1):14–19. Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/2523/article/41017/> (accessed: 08.03.2026).
5. Maksarov V.V., Nguyen V.D. Machining of austenite steels using the method of preliminary local cryogenic treatment. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2026;39(5):1267–1274. <https://doi.org/10.5829/ije.2026.39.05b.18>
6. Maksarov V.V., KufaeV V.G. Magnetic Abrasive Finishing of Workpieces for Anti-friction Bronze Slide Bearing Shells. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. 2026;39(1):26–33. <https://doi.org/10.5829/IJE.2026.39.01A.03>
7. Ботян Е.Ю., Николайчук Л.А., Мартемьянова А.Н., Степук Е.И., Пушкарев А.Е. Совершенствование подхода к организации технических ремонтов карьерных автосамосвалов при помощи систем удаленного мониторинга их узлов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(12-2):137–152. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2025/12-2/12-2_2025_137-152.pdf (дата обращения: 07.04.2026).
Botyan E.Y., Nikolaichuk L.A., Martemyanova A.N., Stepuk E.I., Pushkarev A.E. Improving the approach to the organization of technical repairs of dump trucks using remote monitoring systems of their nodes. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(12-2):137–152. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2025/12-2/12-2_2025_137-152.pdf (accessed: 07.04.2026).
8. Жуков И.А., Верховский М.И. Перспективы применения планетарных механизмов в качестве исполнительных органов роботов-бурильщиков. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(12-3):23–36. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_123_0_23
Zhukov I.A., Verkhovskiy M.I. Prospects for the use of planetary mechanisms as executive bodies of robot drillers. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(12-3):23–36. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_123_0_23
9. Юнгмейстер Д.А., Ефимов Ф.А., Королев Р.И. Обоснование конструкции бункера и механизма подъема для опытного образца добычного морского комплекса. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2026;(4):105–119. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2026_4_0_105
Yungmeister D.A., Efimov F.A., Korolev R.I. Substantiation of hoist bin design and mechanisms for preproduction model of offshore mining facility. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2026;(4):105–119. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2026_4_0_105
10. Prasad V., Mehrotra S.P., Thareja P. Rheological characteristics of concentrated Indian coal ash slurries and flow through pipelines. *Construction and Building Materials*. 2022;361:29624. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129624>
11. Prasad V. Rheology of Non-Newtonian slurries and its effects on pipeline transportation for economical handling of bulk iron ore. *Chemical Engineering Research and Design*. 2025;217:304–317. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2025.04.012>
12. Wang X., Wan W., Liu Y., Gao R., Lu Z., Tang X. Analysis of factors influencing the flow characteristics of paste backfill in pipeline transportation. *Sustainability*. 2023;15(8):6904. <https://doi.org/10.3390/su15086904>
13. Vieira M.G., Peres A.E.C. Effect of rheology and dispersion degree on the regrinding of an iron ore concentrate. *Journal of Materials Research and Technology*. 2013;2(4):332–339. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.07.002>
14. Королев Р.И., Уразов Д.В., Юнгмейстер Д.А., Сержан С.Л., Федоров Е.В. Комплекс послойной механизированной обратной закладки выработанного пространства для утилизации отходов обогащения. *Обогащение руд*. 2025;(6):47–52. <https://doi.org/10.17580/or.2025.06.09>
Korolev R.I., Urazov D.V., Yungmeister D.A., Serzhan S.L., Fedorov E.V. System for layer-by-layer mechanized backfill of mined-out spaces for the disposal of processing waste. *Obogashchenie Rud*. 2025;(6):47–52. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2025.06.09>



15. Большунова О.М., Ватлина А.М., Коржев А.А. Влияние концентрации гидросмеси на энергоэффективность работы системы насос-пульпопровод. В кн.: *Максаров В.В. (ред.) Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021: сб. тезисов 8-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Санкт-Петербург, 22–23 апреля 2021 г.* СПб.: Санкт-Петербургский горный университет; 2021. С. 147–149
16. Авксентьев С.Ю., Белоусов В.И. Определение рациональных параметров для безостановочной работы гидротранспортных систем в условиях низких температур. *Горная промышленность*. 2025;(1S):86–91. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1S-86-91>
Avksentiev S.Yu., Belousov V.I. Determination of rational parameters for non-stop operation of hydraulic transport systems in low temperature conditions. *Russian Mining Industry*. 2025;(1S):86–91. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1S-86-91>
17. Фролов Д.В. Исследование и обоснование подходов к оптимизации процессов сгущения угольных шламов. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2018;(2):61–69. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2018-2-61-69>
Frolov D.V. Research and justification of the ways to optimize coal sludge thickening processes. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2018;(2):61–69. (In Russ.) <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2018-2-61-69>
18. Vahidifar S., Saffarian M.R., Hajidavalloo E. Introducing the theory of successful settling in order to evaluate and optimize the sedimentation tanks. *Meccanica*. 2018;53(14):3477–3493. <https://doi.org/10.1007/s11012-018-0907-2>
19. Nazarychev A., Iliev I., Manukian D., Beloev H., Suslov K., Beloev I. Methodology for developing a maintenance action program for power units of captive power plants based on an integrated priority indicator. *Energies*. 2026;19(6):1584. <https://doi.org/10.3390/en19061584>
20. Сержан С.Л., Скребнев В.И., Малеванный Д.В. Исследование влияния шероховатости стальных и полимерных труб на потери напора при гидротранспорте хвостовой пульпы. *Обогащение руд*. 2023;(4):41–49. <https://doi.org/10.17580/or.2023.04.08>
Serzhan S.L., Skrebnev V.I., Malevanny D.V. Study of the effects of steel and polymer pipe roughness on the pressure loss in tailings slurry hydrotransport. *Obogashchenie Rud*. 2023;(4):41–49. <https://doi.org/10.17580/or.2023.04.08>
21. Николаев А.К., Зарипова Н.А. Обоснование аналитических зависимостей для гидравлического расчета транспорта высоковязких нефтей. *Записки Горного института*. 2021;252:885–895. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.10>
Nikolaev A.K., Zaripova N.A. Substantiation of analytical dependences for hydraulic calculation of high-viscosity oil transportation. *Journal of Mining Institute*. 2021;252:885–895. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.10>
22. Николаев А.К., Зарипова Н.А. Обоснование аналитических зависимостей для гидравлического расчета транспорта высоковязких нефтей. *Записки Горного института*. 2021;252:885–895. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.10>
Nikolaev A.K., Zaripova N.A. Substantiation of analytical dependences for hydraulic calculation of high-viscosity oil transportation. *Journal of Mining Institute*. 2021;252:885–895. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.10>
23. Kopteva A., Malarev V., Koptev V. Investigation on vapor diffusion resistance factor in porous materials. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. 2025;38(1):170–178 <https://doi.org/10.5829/ije.2025.38.01a.16>
24. Бауман А.В. Анализ агрегативной и седиментационной устойчивости технологических пульп. *Обогащение руд*. 2018;(2):55–60. <https://doi.org/10.17580/or.2018.02.10>
Bauman A.V. Analysis of aggregation and sedimentation stability of process slurries. *Obogashchenie Rud*. 2018;(2):55–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2018.02.10>
25. Ревель-Муроз П.А., Фридлянд Я.М., Кутуков С.Е., Гольянов А.И. Оценка гидравлической эффективности нефтепроводов по данным мониторинга технологических режимов эксплуатации. *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2019;9(1):8–19. <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2019-9-1-8-19>
Revel-Muroz P.A., Fridlyand Ya.M., Kutukov S.E., Golyanov A.I. Assessing the hydraulic efficiency of oil pipelines according to the monitoring of process operation conditions. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2019;9(1):8–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2019-9-1-8-19>
26. Смирнов О.Ю. Исследование условий применения систем разработки месторождений с закладкой в различных горно-геологических условиях. Известия высших учебных заведений. *Горный журнал*. 2019;(5):14–20. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-5-14-20>
Smirnov O.Yu. Investigating the conditions of applying the filling method of field development in various mining and geological conditions. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2019;(5):14–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-5-14-20>
27. Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Чан Ч., Масленников С.А. Использование хвостов обогащения в приготовлении твердеющих закладочных смесей. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2018;(2):95–101. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-2-95-101>
Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Chan C., Maslennikov S.A. The use of tailings while preparing hardening filling mixtures. *News of the Ural State Mining University*. 2018;(2):95–101. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-2-95-101>



28. Невзоров Д.Н., Труфанова И.С. Повышение эффективности работы конвейерного поезда: исследование влияния параметров приводной станции на силу сцепления. *Горная промышленность*. 2025;(1):184–191. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-184-191>
Nevzorov D.N., Trufanova I.S. Improving the efficiency of the conveyor train: investigation of the impact of the drive station parameters on the traction force. *Russian Mining Industry*. 2025;(1):184–191. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-184-191>
29. Menukhova T.A., Borodina Y.V. Intelligent system for centralized freight traffic planning. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018;194:072008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/194/7/072008>
30. Menukhova T.A., Egorov S.V. Unified multimodal transport center – A tool for the development of the environmental geology of transport. *Procedia Engineering*. 2017;189:138–144. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.023>
31. Атрощенко В.А., Авксентьев С.Ю., Махараткин П.Н., Труфанова И.С. Экспериментальная гидротранспортная установка для определения стойкости материалов трубопроводов и деталей грунтовых насосов к гидроабразивному износу. *Обогащение руд*. 2021;(3):39–45. <https://doi.org/10.17580/or.2021.03.07>
Atroshchenko V.A., Avksentiev S.Yu., Makharatkin P.N., Trufanova I.S. Experimental hydrotransportation unit for testing material resistance of pipelines and parts of dredging pumps to hydroabrasive wear. *Obogashchenie Rud*. 2021;(3):39–45. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2021.03.07>
32. Alexandrov V.I., Kopteva A.V., Serzan S.L. Effective parameters of tail processing of gold-bearing ore hydrotransport for Verninskaya processing factory. *Key Engineering Materials*. 2020;836:25–35. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.836.25>
33. Александров В.И., Кибирев В.И., Сержан С.Л. Эффективность применения полиуретановых покрытий внутренней поверхности пульповодов в системах гидротранспорта хвостовых пульп. *Обогащение руд*. 2020;(4):35–41. <https://doi.org/10.17580/or.2020.04.06>
Alexandrov V.I., Kibirev V.I., Serzhan S.L. The effectiveness of polyurethane coatings on internal surfaces of slurry lines in tailings slurry hydrotransport systems. *Obogashchenie Rud*. 2020;(4):35–41. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2020.04.06>
34. Liu M., Lu H., Deng Q., Ji S., Qin L., Wan Y. Shear strength, water permeability and microstructure of modified municipal sludge based on industrial solid waste containing calcium used as landfill cover materials. *Waste Management*. 2022;145:20–28. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.04.031>
35. Kuskildin R.B., Vatlina A.M. Method of accelerated industrial testing of hydroabrasive wear of polymer coatings of steel pipes. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1728:012029. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1728/1/012029>

Информация об авторах

Авксентьев Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-0382-1803>; e-mail: Avksentev_SY@pers.spmi.ru

Белоусов Владимир Игоревич – аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: s245065@stud.spmi.ru

Information about the authors

Sergey Yu. Avksentyev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-0382-1803>; e-mail: Avksentev_SY@pers.spmi.ru

Vladimir I. Belousov – Postgraduate Student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: s245065@stud.spmi.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 07.06.2026

Поступила после рецензирования: 29.07.2026

Принята к публикации: 17.08.2026

Article info

Received: 07.06.2026

Revised: 29.07.2026

Accepted: 17.08.2026